شبیه‌سازی آزمون واژگونی اتوبوس O457 و اصلاح سازه آن به‌منظور ارضای شرایط آزمون

محسن اصفهانیان*، احسان کبیری** و سعید ضیائی راد***

دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۸/۱۵ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۱۲/۱۹)

چکیده – هدف از این مقاله، بررسي استاندارد اروپايي واژگوني (Rollover - ECE.66) روي اتوبوس O457 است. اعمال آزمون واژگوني روي سازه مورد نظر به صورت شبيه‌سازي رايانه‌اي انجام گرفته است. با توجه به اندازه بزرگ سازه تحليل‌شده و عدم دسترسي به ابررايانه‌ها، به استناد خود آيين‌نامه واژگوني از روش معادل آزمون اصلي يعني شبيه‌سازي آزمون واژگوني روي مقطع-بدنه استفاده شده است. به دليل عدم امكان آزمون عملي، نتايج حاصل از شبيه‌سازي به صورت كيفي با نتايج تجربي مربوط به كارهاي مشابه مقايسه مي‌گردد. در پايان شبيه‌سازي مشاهده مي‌شود كه عمده تغييرشكلهاي ايجادشده در محل اتصال ستونها با سقف و شاسي بوده و خود سقف و شاسي تغييرشكلهاي كمي پيدا كرده‌اند. تغييرشكلهاي ايجادشده در سازه، از حد مجاز تعيين‌شده در استاندارد بيشتر بوده و اتوبوس تحليل شده شرايط آزمون واژگوني را ارضا نمي‌كند، لذا پيشنهاداتي براي افزايش استحكام سازه ارائه شده و با توجه به امكانات موجود در كارگاههاي ساخت، به اصلاح سازه مورد نظر پرداخته شده است.

واژگان کلیدی : **شبيه‌سازي المان‌محدود- استاندارد ECE66- آزمون واژگوني- اتوبوس**

Rollover Simulation and Required Structural Modification of O457 Bus

M. Esfahanian, E. Kabiri and S. Ziaei-Rad

Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology

Abstract: ***The present paper is to examine European rollover standard (ECE66) on O457 bus, using computer simulation method. Due to the huge size of the analyzed structure and unavailability of supercomputers and also according to the rollover***

* – استادیار ** – دانشجوی کارشناسی ارشد *** – دانشیار

regulation, the equivalent method, i.e., body section rollover test is selected. Also, because of impossibility of real test, the simulation results have been qualitatively compared with the existing experimental results. The extracted results show that deformation occurs mainly in the pillar-to-floor and pillar-to-roof joints, while the roof and chassis have small deformations. As the deformations in the body were greater than the standard level and the bus failed the test, suggestions were made to increase the body strength. The suggestions are based on the available capabilities and limitations of the production process.

Keywords: ***Finite element simulation, ECE66 standard, Rollover test, Bus.***

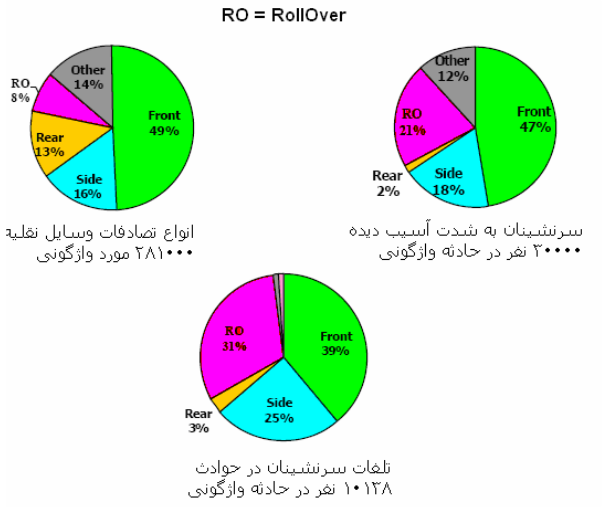
۱- مقدمه

پیش‌بینی دقیق میزان استحکام ساختار وسایل‌نقلیه، برای تعیین میزان امنیت آنها و همچنین کاهش آسیبهای واردشده به مسافرین، ضروری است. شرکتهای خودروسازی در داخل و خارج از کشور، همواره در حال اصلاح طرحهای خود و ارائه مدلهایی جدیدند. بدین منظور تحلیلهای متنوعی روی قسمتهای مختلف خودرو انجام می‌شود تا اجزای مختلف خودرو بتوانند عملکرد بهتری از خود نشان بدهند. آزمون واژگونی نیز یک آزمون دینامیکی است که برای سنجش میزان استحکام بدنه خودروها انجام می‌گیرد. در این میان رعایت استاندارد واژگونی در ساخت خودروها، در کشورهایی نظیر امریکا و سوئد اجباری شده و در سایر کشورهای پیشرفته اروپایی نیز حرکت به‌سوی این هدف جریان دارد. در این مقاله نیز با هدف افزایش امنیت مسافران در اتوبوسهای برون‌شهری، تلاش شده است تا به‌بررسی استاندارد اروپایی واژگونی، بر روی یکی از اتوبوسهای تولیدشده در داخل کشور پرداخته شود.

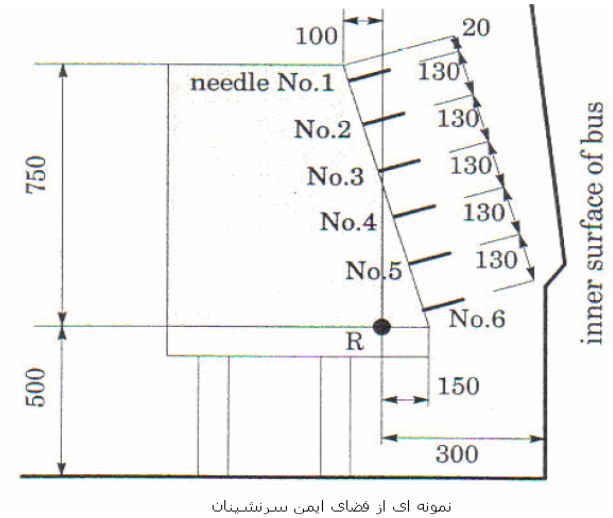
واژگونی نوعی تصادف است که در آن خودرو حداقل یک چهارم دور دوران می‌کند، صرف‌نظر از اینکه خودرو در پایان چرخش، بر روی پهلو یا سقف قرار گیرد و یا حتی دوران کامل کرده و بر روی تایرها قرار بگیرد [۱]. اغلب اوقات پدیده واژگونی هنگامی روی می‌دهد که وسیله‌نقلیه پس از ترک جاده با جدول یا حفاظ کنار خیابان یا چیزی شبیه آن برخورد کرده و به آن گیر کرده و به زمین می‌خورد[۱]. درصد کمی از تصادفات واژگونی در اثر اصطکاک میان تایر و جاده است[۲]. واژگونیهای نوع دوم غالباً در اثر یک تغییر موقعیت ناگهانی در جاده مانند چرخشها یا تغییر مسیرهای سریع رخ داده و همچنین بیشتر تابع ویژگیهای فیزیکی وسیله‌نقلیه بوده و قابل پیش‌گیری‌اند [۲]. احتمال پدیده واژگونی در وسایل نقلیه سنگین که مرکزثقل آنها نسبت به خودروهای سبک در نقطه‌ای بالاتر از سطح زمین قرار دارد، بیشتر است [۳].

واژگونی وسایل‌نقلیه یکی از جدی‌ترین تصادفات جاده‌ای وسایل‌نقلیه است، چرا که احتمال آسیبهای منجر به مرگ در واژگونی نسبت به‌سایر تصادفات جاده‌ای بسیار بیشتر است. تحقیقات انجام‌شده در سالهای ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۱ نشان می‌دهد که علی‌رغم آنکه درصد تصادفات واژگونی در قیاس با سایر تصادفات خیلی کم است ٪۸ ، اما مرگ و میر ٪۳۱ و آسیبهای جدی وارد به مسافرین ٪۲۱ در پدیده واژگونی، سهم عمده‌ای را در آسیبها و تلفات جاده‌ای به‌خود اختصاص می‌دهد. آمار و ارقام دقیقتر برای مقایسه درصد انواع تصادفات و نوع آسیبهای وارده، در شکل (۱) آورده شده است [۴].

واژگونی از مباحث روز دنیا بوده و قدمت چندان زیادی ندارد. نااوکی نی و دستیارش، در مقاله‌ای با عنوان روش تحلیل آزمون واژگونی در اتوبوسهای بزرگ، اقدام به انجام یک آزمون عملی و شبیه‌سازی رایانه‌ای براساس استاندارد اروپایی کرده و به تطابق خوبی میان جوابهای عملی با شبیه‌سازی انجام‌شده رسیدند. به‌منظور اندازه‌گیری میزان تغییرشکل ستونها در هنگام واژگونی، از یک سری نمونه‌های پلاستیکی به‌عنوان نمادی برای فضای سرنشینان[۳] استفاده کردند و تعدادی سوزن با اندازه مشخص، مطابق شکل (۲) کارگذاشتند و در پایان واژگونی با اندازه‌گیری میزان نفوذ سوزنها به داخل نمونه‌های پلاستیکی، مقدار دقیق تغییرشکل ستونها و نفوذ آنها به فضای ایمن سرنشینان معین شد. آنها به ارائه دو راهکار برای کاهش زمان محاسبات در شبیه‌سازی المان‌محدود پرداختند. اول آنکه قسمتهایی از



شکل ۱- مقایسه درصد انواع تصادفات و نوع آسیبهای وارده به سرنشینان [۴]



شکل ۲- اندازه‌گیری مقدار دقیق تغییرشکلها به‌کمک سوزن [۵]

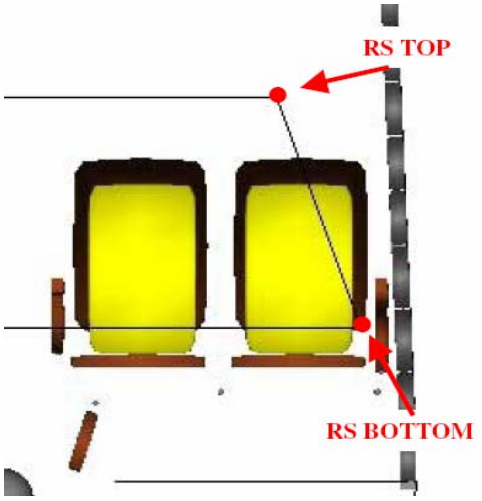
جدول ۱- درصد جرم کوپل‌شده به وسیله‌نقلیه درحین آزمون واژگونی [۶]

جرم کوپل‌شده به سازه	نوع اتصال
۲۰٪	استقرار سرنشینان آزادانه روی صندلی
۷۰٪	اتصال سرنشینان در دو نقطه به صندلی
۹۰٪	اتصال سرنشینان در سه نقطه به صندلی

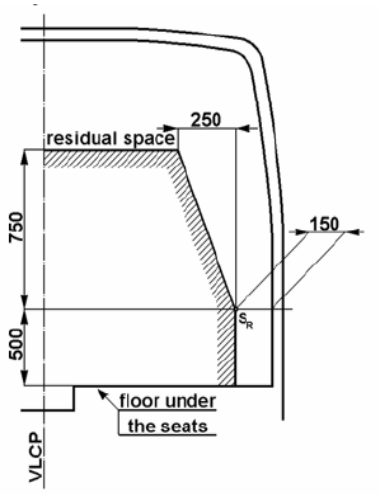
مدل که در آنها تغییرشکلهای اندک پدیدار می‌شود به صورت کلی و با المانهای صلب مدل شود. دیگر آنکه زمان انجام تحلیل کاهش یابد یعنی آنکه تحلیل سازه از لحظه قبل از برخورد با زمین آغاز شود. بدین منظور سرعت وسیله‌نقلیه قبل از برخورد نیاز است که امکان به‌دست آوردن آن از روی آزمون عملی و یا با تقریب خوبی توسط محاسبات وجود دارد [۵].

بلینگاردی، مارتلّو و پرونی در نشستی در تورینو ایتالیا، به‌بررسی تأثیر صندلیها و نحوه اتصال سرنشینان در آسیبهای وارده در هنگام آزمون واژگونی پرداختند. در هنگام واژگونی تنها بخشی از جرم سرنشینان به سازه کوپل (متصل) می‌شود که این مقدار به نحوه اتصال به صندلیها بستگی دارد. در جدول (۱) درصد جرمهای کوپل‌شده بر اساس انواع اتصال، مشخص است [۶].

به‌منظور ارزیابی دقیق تأثیر نوع اتصال سرنشینان بر میزان تغییرشکل ساختار اتوبوس، آزمون واژگونی روی بخشی از سازه (مقطع-بدنه[۴]) در شرایط مختلف اتصال سرنشینان به سازه، انجام‌شده و اجرام و آدمکهای استفاده‌شده به‌گونه‌ای انتخاب شدند که مرکزجرم آنها با واقعیت منطبق باشد. در حین انجام آزمون روی این بخش، دو نقطه بالایی و پایینی فضای سرنشینان که به‌ترتیب با RS TOP و RS Bottom در شکل (۳) مشخص شده است به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری تغییرشکلهای ایجادشده در سازه استفاده می‌شود. آنها به این نتیجه دست یافتند که حضور سرنشینان حتی در حالت آزاد باعث افزایش تغییرشکل سازه می‌شود. بنابراین کسب موفقیت در آزمون واژگونی در حالت نبود سرنشینان،



شکل۳- تعیین دو نقطه به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری تغییرشکلهای سازه [۶]



شکل ۴- نمایش مقطع عرضی ویژگیهای فضای سرنشینان [۷]

منجر به گذر از این آزمون در هنگام لحاظ‌کردن اثر مسافرین، نمی‌شود [۶].

۲- استاندارد واژگونی ECE66

این آیین‌نامه درمورد وسایل‌نقلیه‌ای که برای حمل بیش از ۲۲ مسافر، علاوه‌بر راننده و خدمه، طراحی و ساخت شده‌اند به‌کار می‌رود، خواه مسافرین ایستاده و یا نشسته باشند. مطابق با این استاندارد، ابرسازه[۵] وسیله‌نقلیه باید از استحکام کافی برخوردار باشند تا تضمین کنند که فضای‌سرنشینان در حین و پس از انجام آزمون واژگونی روی وسیله‌نقلیه کامل، بدون آسیب باقی بماند. به‌عبارت دیگر، هیچ بخشی از وسیله‌نقلیه که در آغاز آزمون بیرون از فضای‌سرنشینان قرار دارد (مانند ستونها، قفسه‌ها، طاقچه‌های باری و ...) نباید در حین آزمون به داخل محفظه سرنشینان نفوذ کند. محفظه‌سرنشینان با ایجاد یک صفحه متقاطع عمودی در میان وسیله‌نقلیه، مطابق با شکل (۴)، و حرکت این صفحه در امتداد طول وسیله‌نقلیه ایجاد می‌شود [۷].

روش اصلی آیین‌نامه برای انجام آزمون واژگونی به‌شرح زیر است:

کل وسیله‌نقلیه روی یک صفحه دوار قرار دارد که سیستم تعلیق آن بلوکه شده و به آرامی (سرعتی کمتر از ۵ درجه بر ثانیه) به سمت نقطه ناپایداری حرکت می‌کند. آزمون واژگونی از نقطه ناپایداری وسیله‌نقلیه با سرعت زاویه‌ای تقریبا صفر شروع می‌شود و محور دوران از نقاط تماس تایر با زمین عبور می‌کند. وسیله‌نقلیه به داخل گودال کناری، که دارای سطحی از جنس بتون خشک و عمق اسمی ۸۰۰ میلی‌متر است، دوران و سقوط می‌کند. در لحظه ناپایداری، انرژی E_R بیانگر انرژی مرجع وسیله‌نقلیه بوده و مطابق با شکل (۵) و بر اساس معادله (۱) به‌دست می‌آید.

$$E_1 = M.g.h_1 = M.g.[0.8+\sqrt{h_0^2+(B\pm t)^2}] \qquad (۱)$$

که در آن،

M = جرم مؤثر وسیله‌نقلیه،

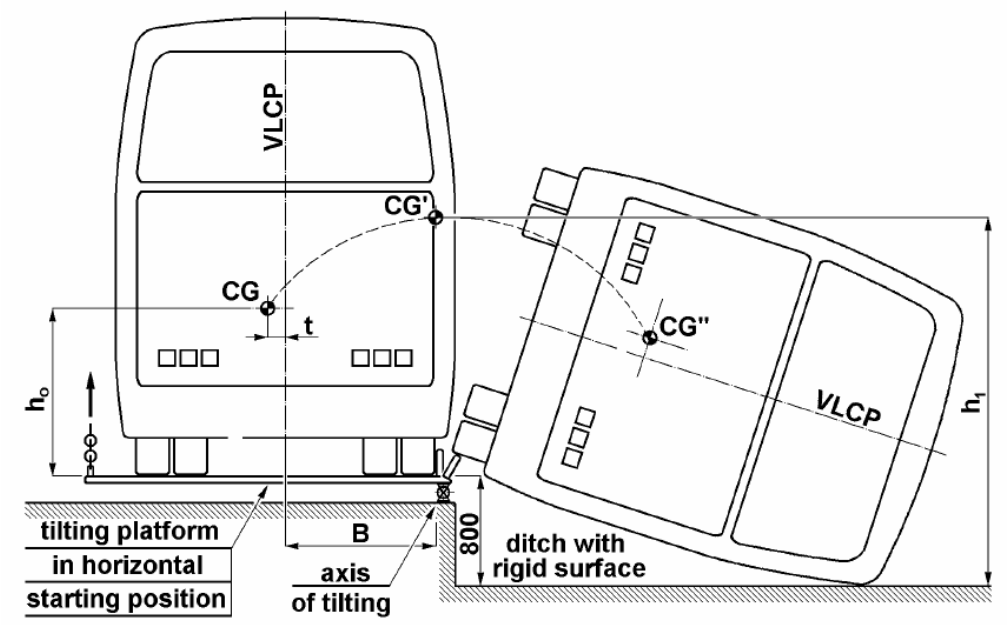
h_0 = ارتفاع مرکزثقل وسیله‌نقلیه

t = فاصله عمودی مرکزجرم اتوبوس، تا صفحه عمودی مرکزی طولی

B = فاصله عمودی میان صفحه عمودی مرکزی طولی، تا محور دوران

g = ضریب شتاب گرانش زمین

h_1 = ارتفاع مرکزثقل وسیله‌نقلیه در آغاز موقعیت ناپایداری نسبت به صفحه افقی پایین گودال کناری.



شکل ۵- ویژگیهای آزمون واژگونی روی کل اتوبوس [۷]

به‌جای انجام آزمون واژگونی مطابق با روش اصلی آیین‌نامه (یعنی انجام آزمون واقعی روی کل وسیله‌نقلیه)، بنا به تشخیص تولیدکننده، یکی از روشهای معادل آزمون می‌تواند انتخاب شود: الف. انجام آزمون واژگونی روی مقاطعی از بدنه که نماینده کل وسیله‌نقلیه باشد. ب. بارگذاریهای شبه‌استاتیکی روی قسمتهایی از بدنه. ج. شبیه‌سازی رایانه‌ای آزمون واژگونی.

۳- شبیه‌سازی آزمون واژگونی

قاعده کلی شبیه‌سازی آزمون واژگونی آن است که ابتدا یک آزمون عملی روی یک مقطع-بدنه انجام‌شده و همان آزمون با نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. پس از دستیابی به فرضیات مناسب و نتایجی منطبق با آزمون عملی (به‌منظور بررسی صحت شبیه‌سازی انجام‌شده)، شبیه‌سازی روی کل سازه اتوبوس تعمیم می‌یابد. اما باتوجه به محدودیتهای مالی موجود، و عدم امکان آزمون عملی، پس از انجام شبیه‌سازی روی سازه اتوبوس، نتایج به صورت کیفی با کارهای مشابه مقایسه شده است. نکته دیگر اینکه آزمون واژگونی مخصوص اتوبوسهای برون‌شهری است، اما با توجه به یکسان بودن سازه و بدنه اتوبوس O457 با اتوبوس برون شهری C457 و همچنین به‌دلیل عدم دسترسی به نقشه‌ها و سایر اطلاعاتی از جمله جنس، وزن و موقعیت دقیق نصب هرکدام از اجزای اتوبوس برون شهری، شبیه‌سازی آزمون واژگونی بر روی اتوبوس O457 که مدارک آن در دست است انجام شده است. بیان تمام مشخصات و ویژگیهای قطعات مدلسازی‌شده در این مقال نمی‌گنجد. لذا به‌منظور آشنایی کلی، برخی از ویژگیهای اتوبوس O457 در زیر ارائه می‌شود:

- طول : ۱۱۹۷۵ میلی‌متر
- ارتفاع از زمین : ۲۹۸۰ میلی‌متر
- عرض : ۲۵۰۰ میلی‌متر
- ارتفاع داخل کابین : ۱۹۰۲ تا ۱۹۷۲ میلی‌متر
- فاصله دو محور : ۶۰۵۵ میلی‌متر
- وزن خالص : ۹۸۲۰ کیلوگرم
- بار مجاز روی اکسل جلو : ۶۰۰ کیلوگرم
- بار مجاز روی اکسل عقب : ۱۱۵۰۰ کیلوگرم
- وزن ناخالص مجاز : ۱۸۰۰۰ کیلوگرم

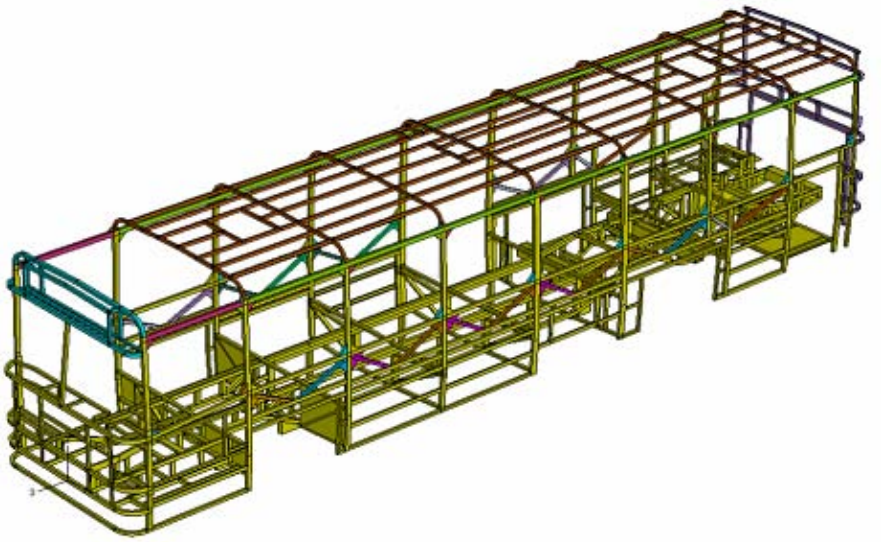
می‌توان روند شبیه‌سازی را به سه بخش کلی تقسیم کرد: تهیه مدل مسئله، پیداکردن سرعت برخورد و نهایتاً شبیه‌سازی برخورد سازه با زمین. توضیح اینکه مدل تهیه شده در ضمن ساده‌سازی، باید دقیق و دارای مرکز جرمی منطبق با واقعیت باشد چون سرعت برخورد اتوبوس با زمین که نقش اصلی در تغییرشکلهای ایجادشده را دارد، براساس گشتاور زاویه‌ای و مرکز ثقل سازه مدل‌شده تعیین می‌شود.

در تهیه مدل المان‌محدود، فقط بخشهایی که جزو ساختار اصلی هستند (در استحکام سازه در هنگام آزمون رول‌اور نقش اصلی دارند)، مدل می‌شوند و از اثر استحکام‌بخشی سایر اجزا مانند صندلیها، اتصالات در و پنجره‌ها و ... صرف‌نظر می‌شود [۷]، هر چند تأثیر وزن و ممانااینرسی دورانی آنها لحاظ خواهد شد. به‌عبارت دیگر قسمتهایی مانند موتور، تایرها، گیربکس، اکسل جلو و عقب، مسافران و راننده، مخزن سوخت و محتویات آن، سیالهای موجود در رادیاتور، گیربکس و ... در مدل مسئله دیده نمی‌شوند، بلکه اثر آنها به‌صورت جرمهای نقطه‌ای ثابت لحاظ می‌شود. پس از تهیه مدل هندسی به‌صورت پوسته، جرمهای نقطه‌ای در نقاط مختلف سازه، به‌کمک قید Tie به‌گونه‌ای اعمال می‌شوند که جرم کل و همین‌طور مرکزثقل مدل المان‌محدود ایجادشده منطبق بر واقعیت باشد. این نکته را نیز باید لحاظ کرد که نیروی ناشی از این جرمها باید در محل درست اعمال شود، به‌عبارت دیگر از ایجاد گشتاورها و تنشهای کاذب ناشی ازاثر جرمهای نقطه‌ای، تا حد ممکن دوری شده است.

شاسی و بدنه اتوبوس، به‌صورت اسکلت یکپارچه با پروفیلهای طولی و عرضی است. این پروفیل‌ها توخالی و چهارگوش و جنس آنها از فولاد ST-52 می‌باشد. فولاد مذکور دارای استحکام تسلیم ۵۰۰MPa و استحکام نهایی ۶۴۴MPa می‌باشد. چگالی فولاد ST-52 برابر با ۷۸۵۰Kg/m3 بوده و مقدار مدول یانگ هم از شیب ناحیه الاستیک نمودار تنش-کرنش به‌دست می‌آید که برابر است با ۲۰۷GPa. مقدار ضریب پواسون هم که تقریباً برای تمام فولادها یکسان است، برابر با ۰/۳ منظور می‌شود. تقریباً تمام اتصالات موجود بین اعضا و قسمتهای ساختار اصلی، از نوع جوشکاریهای سرتاسری است. با توجه به تعداد زیاد این اتصالات، شبیه‌سازی نرم‌افزاری آنها کاری بس طاقت‌فرسا و دشوار است. نکته قابل‌توجه این است که ماده به‌کار رفته در جوشکاری از استحکام بالاتری نسبت به ماده به‌کار رفته در سازه یعنی ST-52 برخوردار است، در نتیجه در هنگام تغییرشکل سازه، تغییرشکلهای ایجادشده در ماده جوش به مراتب کمتر از ماده ST-52 است. بر اساس تحقیقات انجام‌شده و تجربیات به‌دست آمده، و با توجه به تعداد بسیار زیاد این اتصالها، می‌توان با یک فرض کاملاً منطقی این اتصالات را به‌صورت پیوسته و از همان جنس سازه یعنی ST-52 در نظر گرفت. در سازه‌های بزرگ مانند ساختار اصلی اتوبوس مورد نظر، هدف اصلی بررسی وضعیت اتصالات و برهمکنشهای موجود در آنها نبوده، بلکه استخراج تغییر شکلهای ایجادشده در کل سازه دنبال می‌شود. به‌طور خلاصه چنین می‌توان گفت که با فرض مذکور (مدل‌کردن قطعات به صورت پیوسته) علاوه بر ساده‌سازی و عملی‌کردن تحلیل، ضریب ایمنی حل مسئله بیشتر می‌شود چرا که عملاً استحکام اتصالات در شبیه‌سازی کاهش و تغییرشکلهای ایجادشده افزایش داده شده است.

ضریب اصطکاک بین سطوحی از اتوبوس که با کف زمین گودال کناری برخورد دارند، باید بر اساس آزمایشات تجربی و عملی به‌دست بیاید [۷]، اما با توجه به تحقیقات انجام‌شده و کارهای مشابه مقدار آن برابر با ۰/۳ فرض می‌شود. لازم به ذکر است با کاهش این عدد، تغییرشکلها در حین شبیه‌سازی آزمون واژگونی کاهش می‌یابد.

در شکل (۶) تصویری از مدل اجزای محدود روسازه (اجزای اصلی) اتوبوس مذکور در نرم‌افزار آباکوس نشان‌داده شده است. در تهیه این مدل المانهای پوسته S4R به کار رفته است که یک المان پوسته متداول۶ چهارگره‌ای کاهش‌یافته بوده و در هر گره دارای شش درجه آزادی است. این المان برای مدل‌کردن تغییرشکلهای بزرگ و غیرخطی مناسب است. استفاده از این



شکل ۶- مدل اجزای محدود اجزای اصلی اتوبوس

نوع المان، اولا زمان حل مسئله را نسبت به المانهای سه‌بعدی آجری۷ بسیار کمتر می‌سازد، ثانیاً مقاطع مورد تحلیل دارای ضخامت بسیار اندک در مقایسه با دو بعد دیگر بوده و در مواردی که یک بعد از بقیه ابعاد کوچکتر است می‌توان از المان پوسته استفاده کرد. نکته مهم در هنگام کاربرد این المان، بررسی انرژی به‌کار رفته درکنترل پدیده ساعت‌شنی۸ است. به‌صورت یک قانون کلی، می‌توان چنین گفت که حالت ایدئال آن است که میزان انرژی صرف‌شده برای کنترل پدیده ساعت‌شنی، کمتر از پنج درصد انرژی‌داخلی کل باشد [۸].

دو روش برای انتگرال‌گیری در فرمولبندی المانهای پوسته وجود دارد، سیمپسون و گوس. روش گوس با سه نقطه انتگرال‌گیری در ضخامت المان پوسته، دقتی تقریباً مساوی با روش سیمپسون با پنج نقطه انتگرال‌گیری دارد. با انتخاب روش گوس با سه نقطه انتگرال‌گیری، علی‌رغم سرعت بالاتر، جوابها با کمتر از چند درصد تفاوت، به‌دست می‌آید، لذا کلیه قسمتها با روش گوس و با سه نقطه انتگرال‌گیری تحلیل می‌شود.

پس از تهیه مدل مسئله و استخراج مومنتم زاویه‌ای حول محور دوران (محل تماس تایرها با زمین)، سرعت برخورد اتوبوس در لحظه برخورد با کف گودال کناری به دو روش تحلیلی و نرم‌افزاری به‌دست آمده و با هم مقایسه شده‌اند. در روش تحلیلی با فرض ثابت بودن محور دوران در حین آزمون واژگونی، همچنانکه در معادله (۲) مشاهده می‌شود، داریم:

$$M.g.(h_1 - h_2) = \frac{1}{2} I.\omega^2 \qquad (۲)$$

که در آن،

M = جرم مؤثر وسیله‌نقلیه

g = ضریب شتاب گرانش زمین

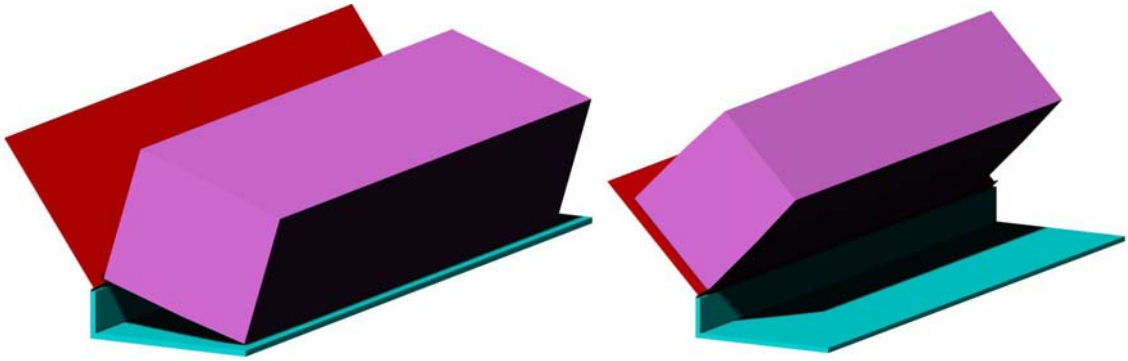
h_1 = ارتفاع مرکزثقل وسیله‌نقلیه در موقعیت ناپایداری نسبت به صفحه افقی پایین گودال کناری، بر حسب متر

h_2 = ارتفاع مرکزثقل وسیله‌نقلیه در لحظه قبل از برخورد با زمین، نسبت به صفحه افقی پایین گودال کناری، بر حسب متر

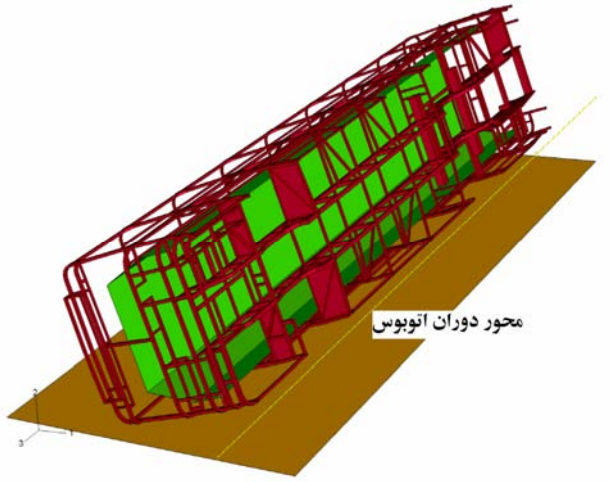
I = مومنتم زاویه‌ای اتوبوس نسبت به محور دوران (در محل تماس تایرها با زمین)، بر حسب $Kg.m^2$

ω = سرعت زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه.

با جایگذاری مقادیر عددی در معادله (۲)، مقدار ω در لحظه برخورد اتوبوس با زمین، برابر با ۱۲۴/۹ درجه بر ثانیه به‌دست می‌آید. برای اطمینان از صحت جواب به‌دست آمده، مسئله بار دیگر به‌کمک نرم‌افزار ویژوال نسترن شبیه‌سازی شده و سرعت برخورد اتوبوس با زمین استخراج می‌شود. مطابق با شرایط



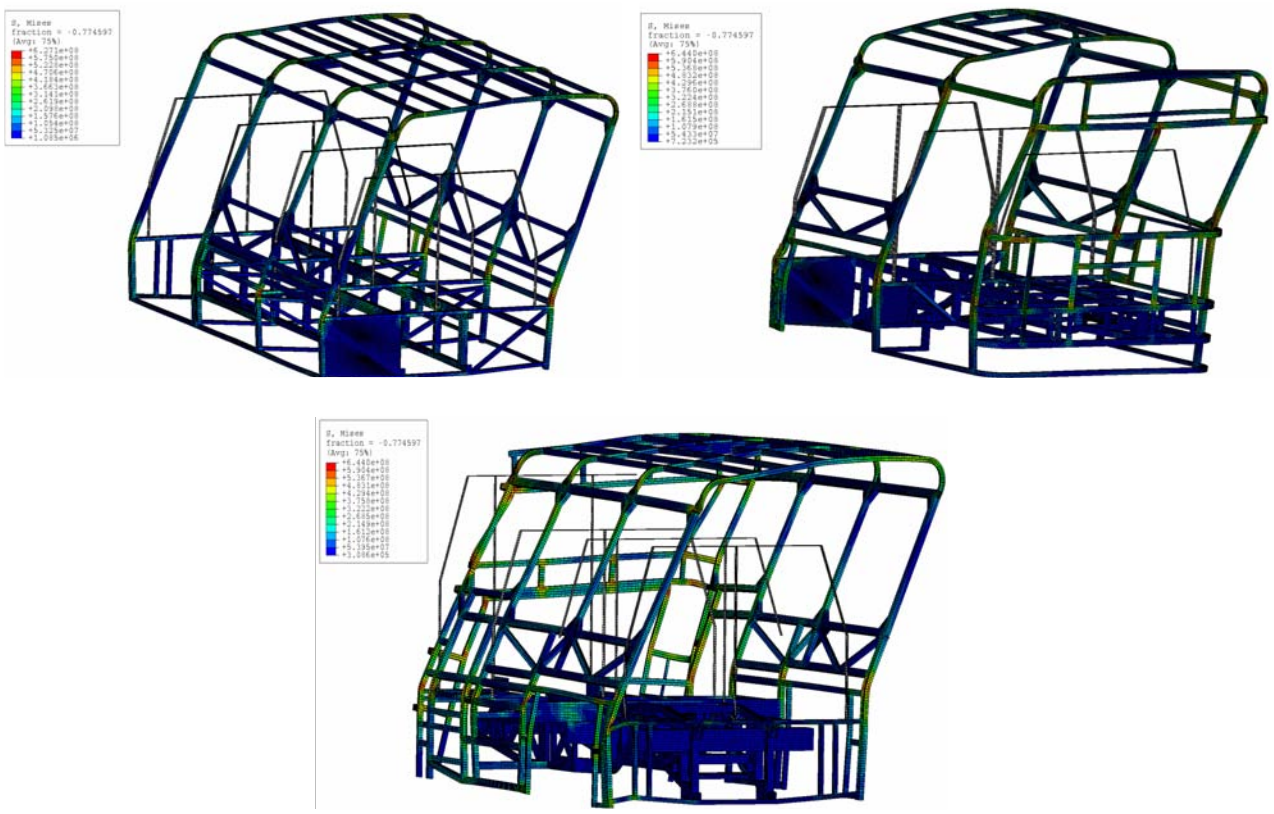
شکل ۷- استخراج سرعت برخورد با زمین توسط نرم‌افزار



شکل ۸- نمایش اتوبوس و فضای سرنشینان در لحظه برخورد با زمین

آیین‌نامه همچنانکه در شکل (۵) مشاهده شد، یک مدل صلب در نرم‌افزار ویژوال نسترن به‌گونه‌ای تهیه شده که مرکز ثقل و ممان اینرسی دورانی آن منطبق با واقعیت باشد. مدل تهیه شده برروی یک صفحه دوار که با سرعت ۵ درجه بر ثانیه دوران کرده و مشخصات هندسی آن از جمله ارتفاع، پهنا و شعاع انحنای سر پله گیردار، کاملا مشخص است [۷]، قرار می‌گیرد. با دوران صفحه و رسیدن به نقطه تعادل ناپایدار، همچنانکه در تصویر سمت راست شکل (۷) مشاهده می‌شود، اتوبوس تحت اثر نیروی گرانش و سرعت اولیه از صفحه دوار جدا شده و شروع به واژگونی می‌کند. در تصویر سمت چپ شکل (۷) نیز لحظه برخورد اتوبوس با زمین مشاهده می‌شود. لازم به‌ذکر است به‌دلیل کوچک بودن تغییرشکلهای ایجاد شده تا قبل از برخورد با زمین، سازه صلب فرض شده که با این فرض مرکز ثقل و ممان اینرسی دورانی حول مرکز ثقل ثابت بوده, اما بر خلاف روش تحلیلی بدیهی است که محور دوران در حین واژگونی ثابت نیست. سرعت دوران به‌دست آمده از این روش ۱۲۱ درجه بر ثانیه است که تفاوت چندانی با نتیجه به‌دست آمده از روش تحلیلی ندارد. اختلاف ناچیز میان نتایج، علاوه‌بر صحت نتایج، حاکی از منطقی‌بودن فرض استفاده شده در روش تحلیلی، مبنی بر ثابت‌بودن محور دوران در حین واژگونی است. لذا در فرایند شبیه‌سازی برخورد سازه با زمین، به‌منظور ساده‌سازی در اعمال سرعت اولیه اتوبوس در لحظه برخورد با زمین، از فرض ثابت بودن محور دوران در حین واژگونی و سرعت برخورد ۱۲۴/۹ درجه بر ثانیه استفاده شده و از خطای نسبی ۳/۲ درصدی، صرف‌نظر شده است. با داشتن سرعت دورانی، برخورد سازه مدل‌شده با زمین توسط نرم‌افزار آباکوس صریح[۹] انجام شده است. سازه مورد نظر به همراه فضای سرنشینان در شکل (۸) مشاهده می‌شود.

برای شبکه‌بندی سازه نشان‌داده شده، از المانهای مربعی با اندازه ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است، یعنی در پهنای یک ستون حداقل دو المان وجود دارد (لازم به ذکر است هنگام کاربرد المانهای ریزتر، کمتر از ۵ درصد تغییر در نتایج مشاهده شد). با این ابعاد، در کل ساختار بیش از نیم میلیون المان تشکیل می‌شود. از آنجا که چنین تحلیلی با رایانه‌های معمولی ناممکن است، سازه به سه مقطع-بدنه جلویی، وسطی و عقبی تقسیم شده و شبیه‌سازی برخورد روی هر قسمت



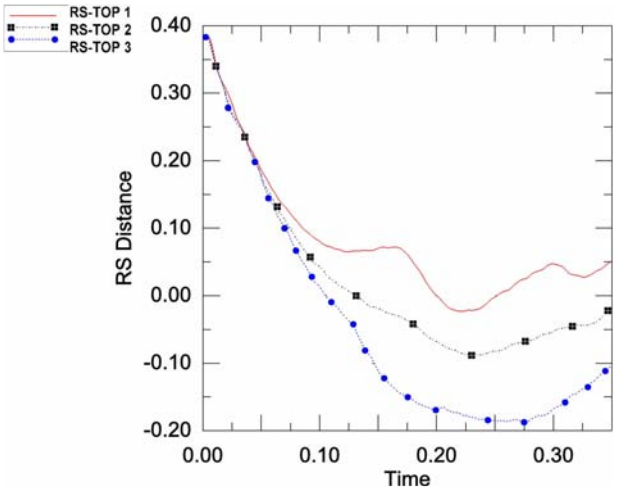
شکل ۹- شکل تغییرشکل‌یافته سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی

به‌طور جداگانه انجام می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، به استناد آیین‌نامه روش آزمون واژگونی روی مقطع-بدنه اتخاذ می‌شود. شکل هندسی و پیچیدگیهای بخشهای مختلف سازه و همچنین محدودیت در تعداد المانها در اینکه سازه به چند بخش تقسیم گردد دخالت دارد.

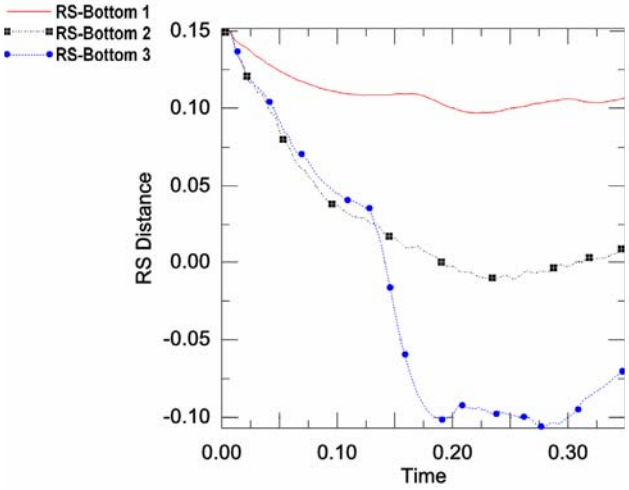
با توجه به آن که مجموع جرم مقطع-بدنه‌های مورد تحلیل، از جرم کل سازه بزرگتر است [۷] و همچنین استحکام هر یک از بخشها به‌طور منفصل بررسی می‌شود، بدیهی است که تحلیل روی مقطع-بدنه، بررسی و طراحی مجدد را به‌سوی امنیت و ضریب ایمنی بالاتری سوق می‌دهد. به‌عبارت دیگر آزمون واژگونی روی مقطع-بدنه، روش محافظه‌کارانه تأیید آزمون واژگونی است، بنابراین در صورتی که سازنده این روش را برگزیند، سطح ایمنی تأیید آزمون، مساوی یا بیشتر از هنگام انجام آزمون به شیوه اصلی آیین‌نامه خواهد بود [۹].

فرم تغییرشکل‌یافته سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی در تصویر (۹) مشاهده می‌شود. چنانچه در این شکل دیده می‌شود، فضای سرنشینان که تنها معیاری برای اندازه‌گیری تغییرشکلهای ایجادشده در ستونهاست، فقط در مقابل ستونها مدل شده است، این کار به دلیل کاهش تعداد المانها و افزایش سرعت تحلیل است.

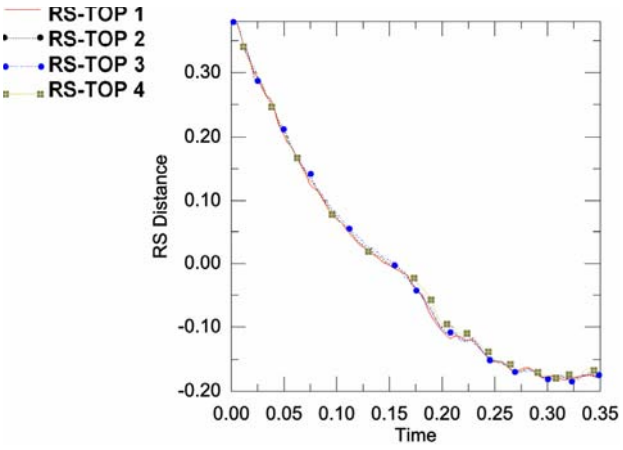
تغییرشکل هر یک از ستونها، در هر مقطع-بدنه به‌صورت مجزا و در دو نقطه بالایی و پایینی در طول آزمون واژگونی استخراج شده و در شکلهای (۱۰) تا (۱۵) آورده شده است. از تصاویر و نمودارها مشخص است که در هنگام برخورد با سطح زمین، با گذر زمان تغییرشکل ستونها و نفوذ آنها به داخل فضای سرنشینان بیشتر می‌شود. اما پس از چندی، به‌علت برگشت‌پذیری تغییرشکلهای الاستیک ایجادشده، مقدار نفوذ به داخل فضای سرنشینان کمتر می‌شود. این پدیده (حداکثر تغییرشکل) بسته به تفاوتهای موجود در مدل هندسی و جرمهای متصل‌شده، در هر یک از ستونها، در زمانهای متفاوتی



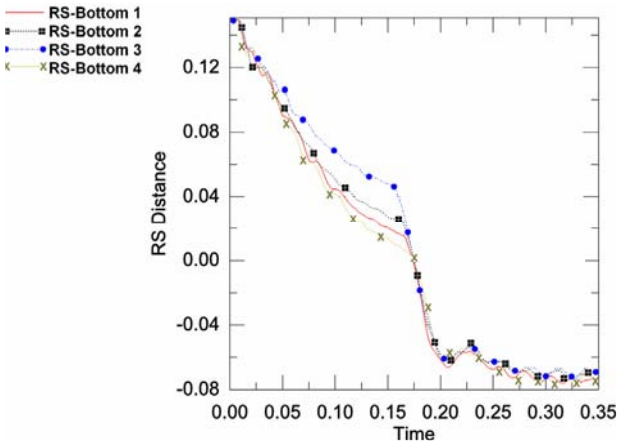
شکل ۱۰- فاصله RS TOP برحسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه جلویی



شکل ۱۱- فاصله RS BOTTOM برحسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه جلویی



شکل ۱۲- فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه وسطی

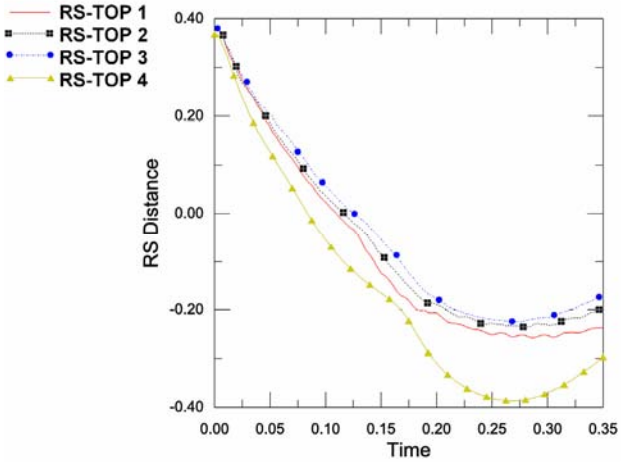


شکل ۱۳- فاصله RS Bottom برحسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه وسطی

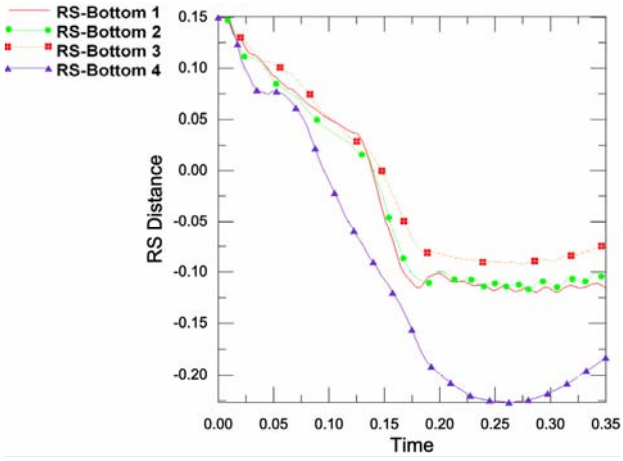
روی می‌دهد. همچنین در برخی ستونها، حداکثر نفوذ به داخل فضای سرنشینان به‌وضوح قابل رؤیت بوده و در برخی دیگر، بازگشت تغییرشکلهای الاستیک محسوس نیست. لازم به‌ذکر است که نفوذ سطح داخلی ستونها به سطح بیرونی فضای سرنشینان، هنگامی است که فواصل مربوط به RS TOP و RS BOTTOM مقادیر منفی داشته باشند، یعنی در نمودارهای ۱۰ تا ۱۵، گذر منحنی به زیر خط صفر، نشانگر فاصله منفی یا نفوذ به داخل فضای سرنشینان می‌باشد.

۴- بحث و بررسی نتایج

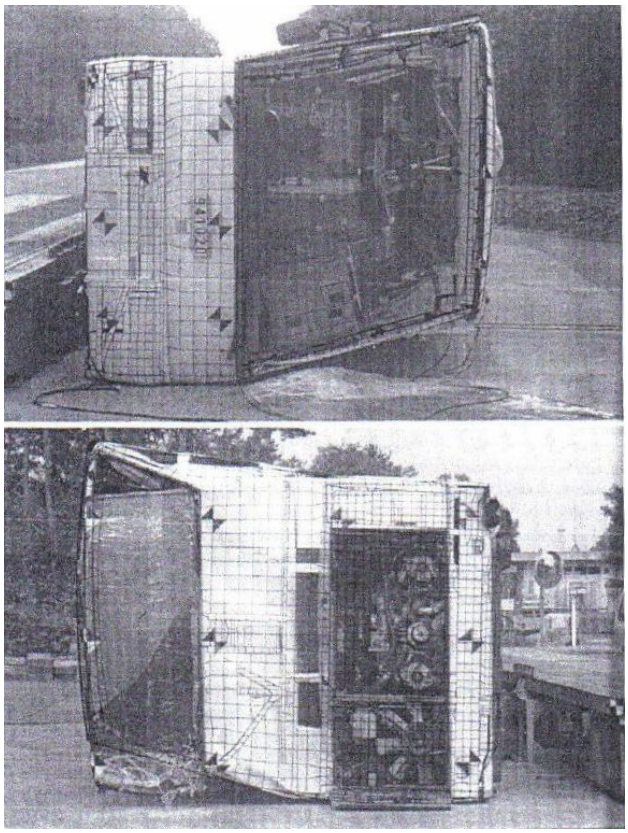
از شکلهای (۱۰) و (۱۱) مشخص است که در مقطع-بدنه جلویی، به‌خاطر اثر استحکام‌بخشی ساختار جلوی اتوبوس، ستون یک کمترین و به‌دلیل اثر وزن اکسل جلویی، ستون سوم بیشترین تغییرشکل را دارد. ساختار مقطع-بدنه میانی تقریباً در تمام قسمتها یکنواخت بوده و تغییرشکل ستونها در این بخش، همچنان که در تصاویر (۱۲) و (۱۳) ملاحظه می‌شود، یکسان است. اما مطابق با شکلهای (۱۴) و (۱۵) بیشترین تغییرشکلها در ساختار عقبی و به‌علت استقرار عمده جرمهای سنگین در



شکل ۱۴- فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی



شکل ۱۵- فاصله RS BOTTOM برحسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی

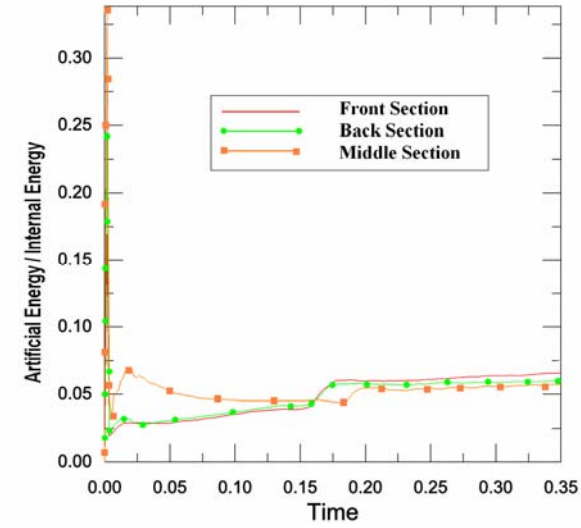


شکل ۱۶- نمای جلو و پشت از شکل تغییرشکل‌یافته یک اتوبوس در پایان آزمون[۵]

این مقطع مشاهده می‌شود. در این مقطع بیشترین مقدار تداخل به فضای سرنشینان در ستون آخر رخ می‌دهد چرا که در این قسمت فضای سرنشینان به‌علت موقعیت مسافرین در عقب اتوبوس، نسبت به بقیه جاها مرتفعتر (بزرگتر) است.

در شکل (۱۶) تصویری از شکل تغییرشکل‌یافته یک اتوبوس در پایان آزمون واژگونی، آورده شده است. در نتایج به‌دست آمده تغییرشکل در سمتی که با زمین برخورد کرده، فقط به میزان اندکی بیش از سمت مخالف بوده است. همچنین عمده تغییرشکلها در ستونها و اتصال آنها با ساختار سقف و کف اتوبوس مشاهده شده است. نتایج حاصل از آزمون عملی واژگونی نشان می‌دهد که تغییرشکلها در جلوی اتوبوس عمدتاً در اتصالات ستون به سازه کف و سقف روی داده و تغییرشکلها در سقف اتوبوس کم است. نمای پایینی بیانگر آن است که موتور، متعلقات آن و سیستم تعلیق از تغییرشکلهای عمده به دور بوده و مخزن سوخت پس از آزمون هیچ‌گونه نشت نداشته و آسیبی به سیمها و اتصالات برقی هم نرسیده است [۵].

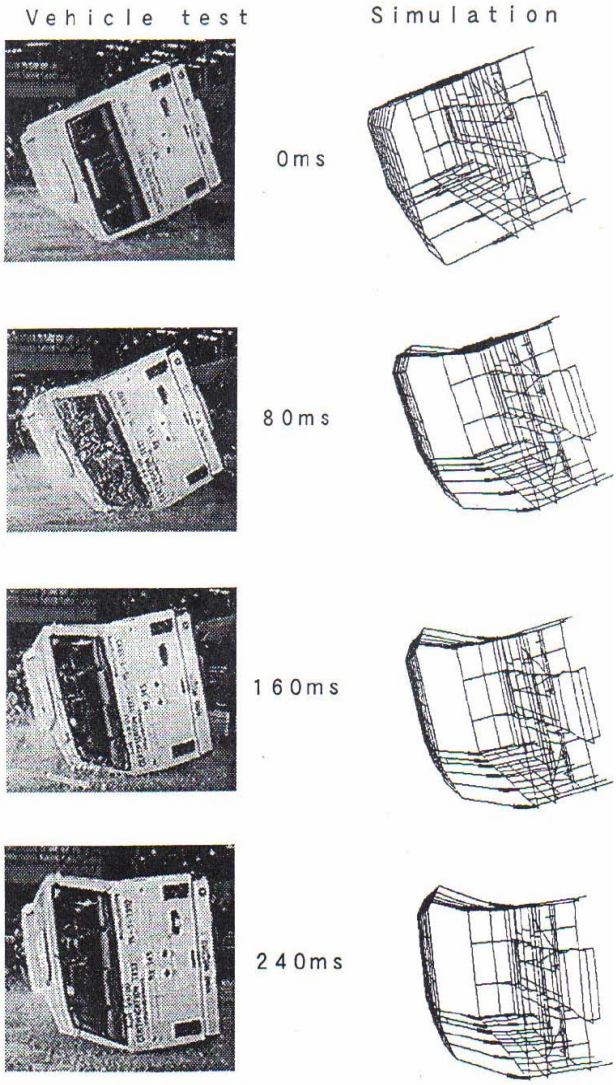
در شکل (۹) که شکل تغییرشکل‌یافته مقاطع مورد تحلیل نشان داده شد نیز ویژگیهای فوق به چشم می‌آید، یعنی عمده تغییرشکلها در ستونها و محل اتصال آنها با کف یا سقف پدیدار شده و تغییرشکلها در سقف و شاسی کمتر است.



شکل ۱۷- نسبت انرژی‌مصنوعی به انرژی‌داخلی بر حسب زمان

در شکل (۱۷) نسبت انرژی‌مصنوعی (انرژی تلف‌شده برای کنترل پدیده ساعت‌شنی) به انرژی‌داخلی بر حسب زمان برای تحلیلهای انجام‌شده نشان داده شده است. این نسبت باید کمتر از ۵ درصد باشد [۸] که در شکل (۱۷) این مقدار به ۶/۵ درصد هم می‌رسد. علت این امر درشت‌بودن اندازه المانهاست، یعنی با کاهش اندازه المانها می‌توان درصد انرژی‌مصنوعی را هم کاهش داد. نکته دیگر اینکه مقادیر زیاد و پرشهای اولیه موجود در نمودار ناشی از خطاهای عددی بوده و و قابل چشمپوشی است [۸].

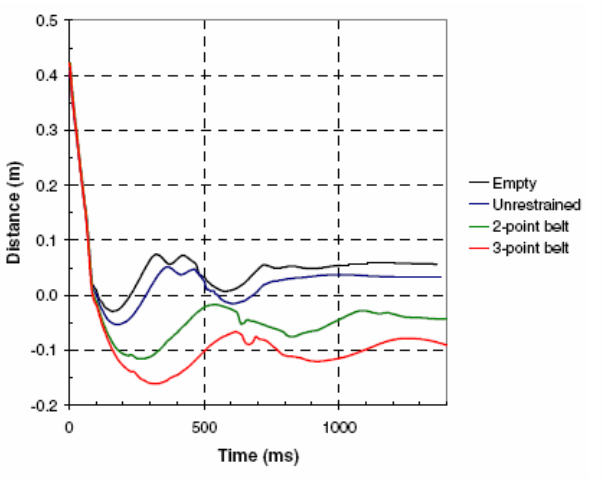
به‌منظور مقایسه کیفی جوابهای به‌دست آمده، در ادامه نمونه‌هایی از نتایج مربوط به آزمون واژگونی ارائه می‌شود. در شکل (۱۸) نتایج مربوط به شبیه‌سازی آزمون واژگونی و مقایسه آن با آزمون عملی، برای یک نمونه اتوبوس آورده شده است [۱۰]. آنچه در تصویر دیده می‌شود، حاکی از انطباق کامل مدل با نمونه واقعی است. در شکلهای (۱۹) و (۲۰) نیز فواصل مربوط به RS TOP و RS BOTTOM برای آزمون انجام‌شده روی یک مقطع-بدنه مشاهده می‌شود [۶]، که با آنچه در نمودارهای (۱۰) تا (۱۵) مشاهده شد، مطابقت خوبی دارد.



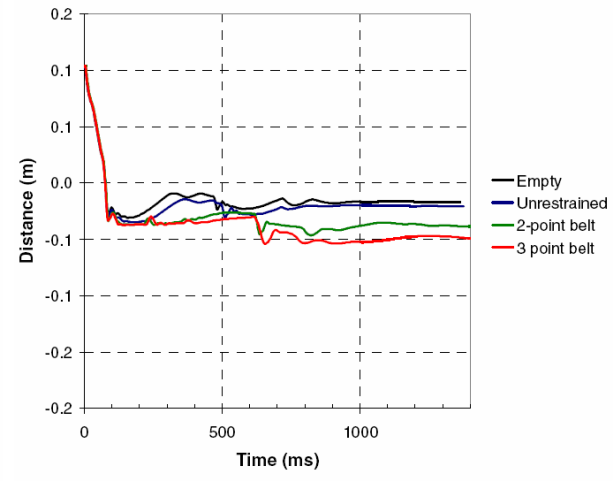
شکل ۱۸- تطابق نتایج شبیه‌سازی رایانه‌ای با نتایج عملی [۱۰]

۵- اصلاح سازه اتوبوس به‌منظور ارضای شرایط آزمایش واژگونی

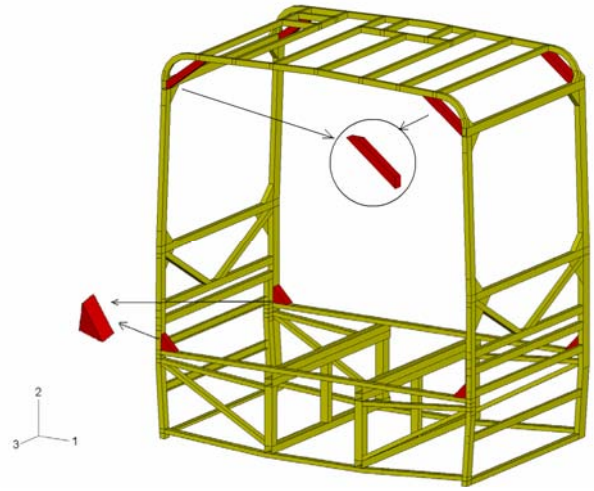
با توجه به عدم وجود نظریه‌ها و فرمولهای لازم برای محاسبه تغییرشکلهای الاستیک و پلاستیک در سازه‌های پیچیده، تحت بارگذاریهای ضربه‌ای، به‌کمک نرم‌افزارهای المان‌محدود و با سعی و خطا می‌توان به اصلاح طرحهای موجود پرداخت. برای کاهش تغییرشکل ستونها و افزایش استحکام قسمتهای تحلیل شده در آزمون واژگونی، پیشنهاداتی براساس تجربیات مهندسان خط تولید اتوبوس و همچنین امکانات اجرایی و مالی موجود



شکل ۱۹- فاصله میان ستونها با نقطه بالایی در حین آزمون [۶]



شکل ۲۰- فاصله میان ستونها با نقطه پایینی در حین آزمون [۶]



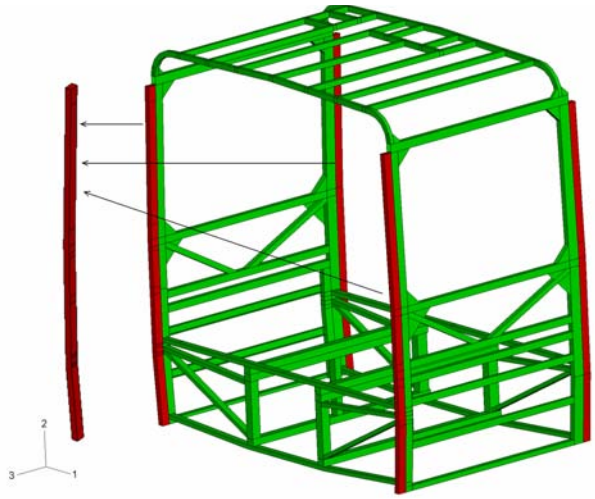
شکل ۲۱- تقویت ستونها در محل اتصال با سقف و شاسی

در کارگاههای تولیدی ارائه و بررسی شده است. یک راهکار قابل‌قبول شامل طرحها و فرضیاتی است که به اندازه کافی در افزایش استحکام و کاهش تغییرشکلها مؤثر بوده و ساخت آنها بر اساس امکانات فعلی موجود در کارگاههای تولید در داخل کشور امکانپذیر باشد، و از طرف دیگر مشکلی در عملکرد ساختار فعلی اتوبوس ایجاد نکند. همچنین حداقل تغییرممکن را درسازه فعلی ایجاد کند. به‌منظور تسریع در روند شبیه‌سازی، ابتدا تأثیر راهکارهای پیشنهادی روی یک مقطع-بدنه کوچکتر بررسی شده است.

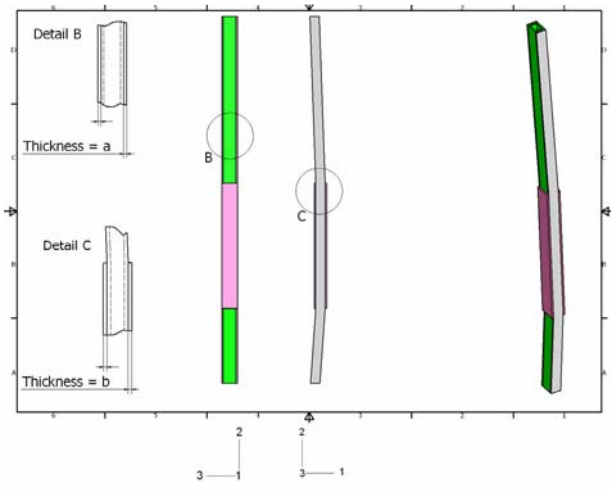
یک پیشنهاد استفاده از صفحات و ریبهای کمکی در محل اتصال ستونها به سقف و شاسی، مطابق با شکل (۲۱) است. با انجام این تحلیل مشاهده شد که این روش مانع از نفوذ ستونها به داخل فضای سرنشینان نمی‌شود. لازم به‌ذکر است که استفاده از ریبهای بزرگتر، به‌دلیل تأثیر گذاری کم و ایجاد محدودیتهایی در کابین مسافرین توصیه نمی‌شود.

دیگر پیشنهاد به‌منظور افزایش استحکام بدنه اتوبوس، استفاده از ستونهایی با ضخامت بیشتر است. توضیح آنکه در ساخت ستونهای فعلی اتوبوس از پروفیلهایی با ضخامت دو میلی‌متر استفاده شده است. با وجود آنکه این روش مؤثر به نظر می‌رسد، اما محاسبات نشان داده که برای قسمتهایی که تغییرشکل آنها زیادتر است، پروفیلهایی با ضخامت سه میلی‌متر هم جوابگو نیست، از طرفی به‌دلیل نیاز به خمکاری در پروسه تولید ستونها، ضخامتهای بالاتر مشکلاتی را در روند تولید به‌وجود می‌آورد. با این توضیحات این روش نمی‌تواند چندان قابل‌قبول باشد.

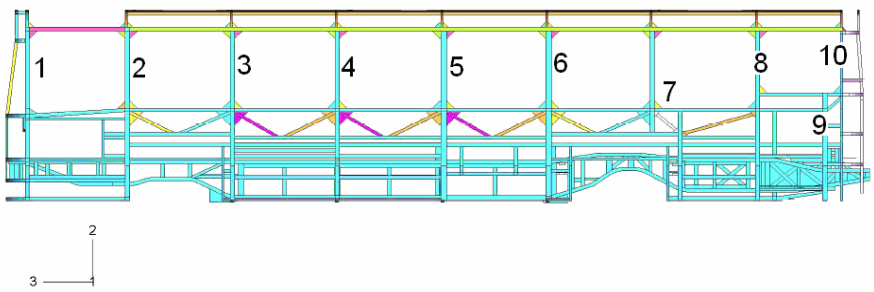
یک راهکار مؤثر برای افزایش استحکام سازه مورد تحلیل استفاده از ستونهای دوگانه مطابق با شکل (۲۲) است. نتایج تحلیل آزمون واژگونی روی مقطع-بدنه نشان‌داده شده در شکل (۲۲) حاکی از آن است که تغییرشکل ستونها بسیار کمتر شده و دیگر نفوذ به داخل فضای سرنشینان وجود ندارد. البته استفاده از این روش برای بهینه‌سازی بدنه اتوبوس، مستلزم



شکل ۲۲- کاربرد ستونهای دوگانه برای افزایش استحکام سازه



شکل ۲۳- نمایش یک ستون تقویت‌شده که صفحات کمکی به آن جوش خورده‌اند

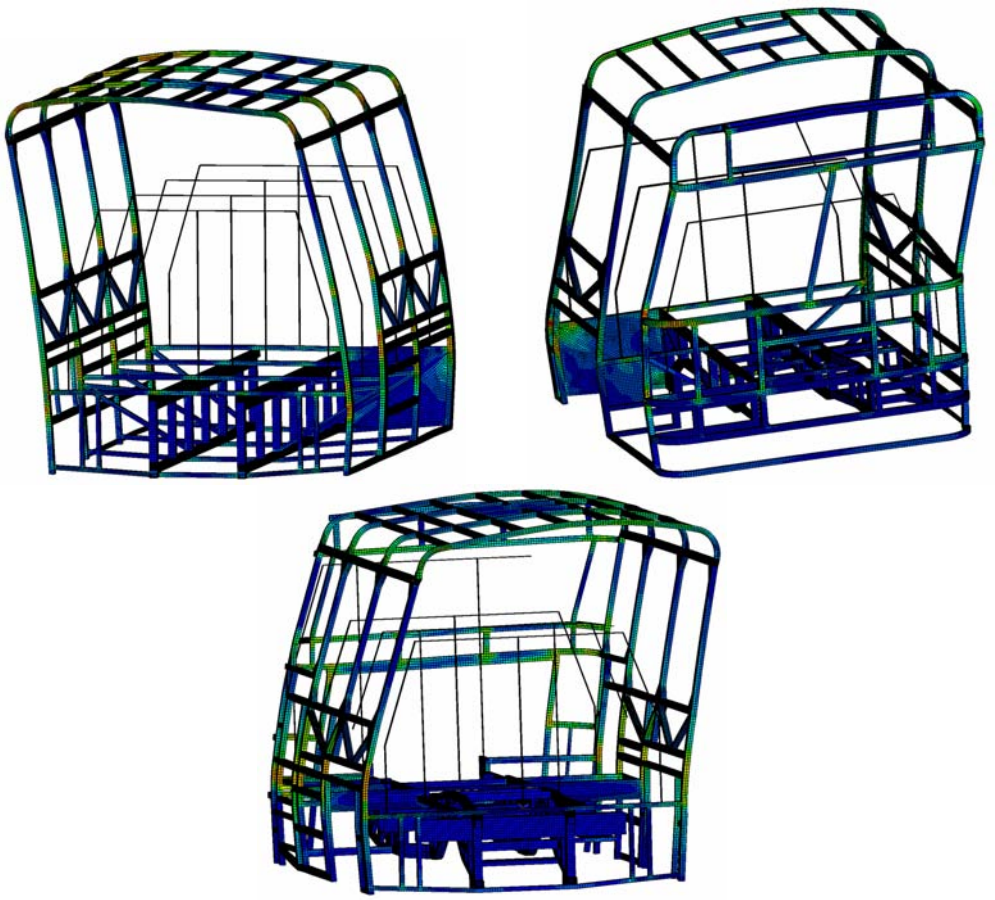


شکل ۲۴- شماره‌گذاری زوج ستونهای اتوبوس از جلو به عقب

تغییر طول لینکهای اتصالی و ابعاد پنجره‌هاست. با در نظر گرفتن شرایط فعلی موجود در گارگاه ساخت بدنه اتوبوس در شرکت ایران خودرو دیزل، این امر امکانپذیر وبی‌نیاز ازهزینه‌های اضافی جهت تغییرات اساسی در مراحل ساخت است.

روش دیگری که به‌منظور استحکام‌بخشی بیشتر قبلا در بخشهایی از شاسی، با موفقیت به‌کار رفته است، جوش‌دادن صفحات کمکی به‌منظور تقویت ستونهاست. این روش از نظر استحکام‌بخشی تقریباً معادل روش قبلی یعنی به‌کار بردن ستونهای ضخیمتر است، با این تفاوت که در این روش مشکلات مربوط به خمکاری پروفیلهای ضخیم وجود ندارد. با توجه به شکل (۲۳) می‌توان ورقهایی با ضخامت مورد نیاز را در محل اتصال ستونها با سقف و شاسی، جوش داد تا استحکام ستونها به حد کافی افزایش یابد. در هر حال شرط استفاده از این راهکار این است که به‌همان اندازه که ضخامت ستونها زیاد می‌شود، طول لینکهای اتصالی بین ستونهای مجاور و همچنین اعضایی که شاسی را به ستونها وصل می‌کنند، به اندازه کافی کوتاهتر شوند. البته این تغییر ابعاد در حدود چند میلی‌متر بیشتر نیست.

در شکل (۲۴) نمایی از بدنه اتوبوس، که در آن ستونها از جلو به عقب شماره‌گذاری شده‌اند مشاهده می‌شود. لازم به‌ذکر است که ستونها در سمت چپ و راست اتوبوس (قبلا گفته شد که چپ و راست نسبت به موقعیت راننده تعیین می‌شود) یکسان‌اند و هر گونه تغییر روی هر یک از زوج ستونهای متقابل اول تا دهم، یکنواخت است. با این توضیحات



شکل ۲۵- شکل تغییرشکل‌یافته سه مقطع-بدنه پس از بهینه‌سازی

تغییرات اعمال‌شده روی هر یک از زوج ستونهای اول تا دهم بدین شرح است:

الف. ستون اول: هیچ‌گونه تغییری در زوج ستون شماره یک نیاز نیست، چرا که علاوه بر اتصالات و لینکهای موجود در قسمت جلوی اتوبوس که خود جنبه استحکام‌بخشی فراوان دارد، بهینه‌سازی ستون دوم، افزایش استحکام و کاهش تغییرات ستون یکم را به‌دنبال دارد.

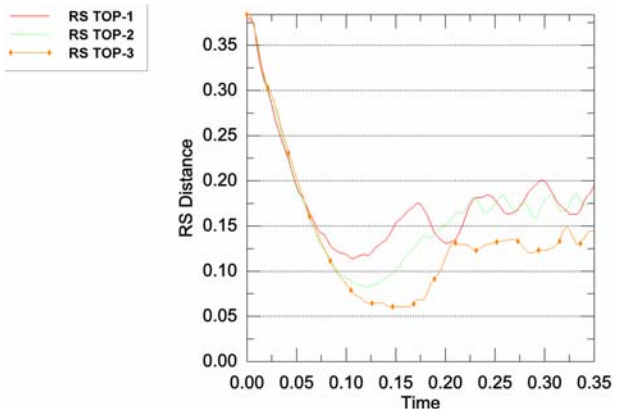
ب. ستون دوم: با توجه به شکل (۲۳)، مقدار a برابر با ۲ میلی‌متر بوده و از صفحات با ضخامت b استفاده نشده است.

پ. ستون سوم: در این‌جا از ستون دوگانه به‌همراه صفحات تقویتی استفاده شده است. در این‌جا از سه صفحه تقویتی با ضخامت a استفاده شده است. مقدار a و b برابر با ۲ میلی‌متر است.

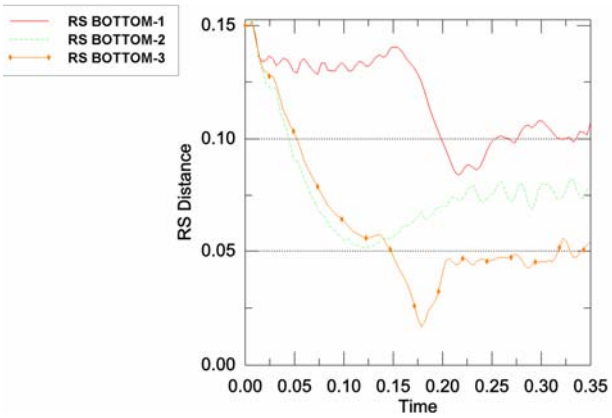
ت. ستونهای چهارم و پنجم: تغییرات اعمال‌شده روی این دو ستون مشابه است. مطابق با شکل (۲۳) مقدار a و b برابر با ۲ میلی‌متر است.

ث. ستونهای ششم تا دهم: این ستونها به‌دلیل اینکه عمده وزن اتوبوس را تحمل می‌کنند و در حین آزمون واژگونی تغییر شکلهای بیشتری نشان می‌دهند، نیاز به صفحات تقویتی ضخیمتر دارند. بدون منظور با توجه به شکل (۲۳) مقدار a و b برابر با ۴ میلی‌متر برای ضخامت صفحات تقویتی به‌کار رفته در این ستونها استفاده می‌شود.

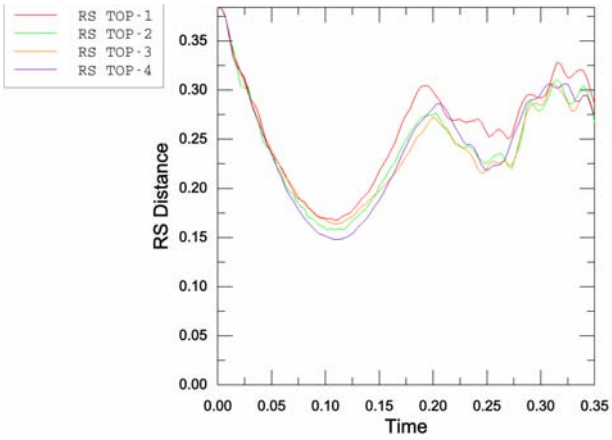
با اعمال این تغییرات، حداکثر تغییرشکل در سه مقطع-بدنه جلویی، وسطی و عقبی کاهش یافته و درحین آزمون واژگونی، دیگر تداخلی میان ستونها و فضای سرنشینان وجود ندارد. در تصویر (۲۵) شکل تغییرشکل‌یافته سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی پس از بهینه‌سازی مشاهده می‌شود. میزان تغییر شکل



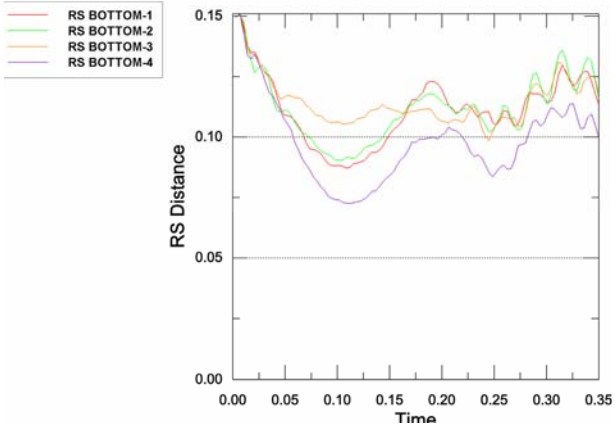
شکل ۲۶- نمودار فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه جلویی بهینه‌شده



شکل ۲۷- نمودار فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه جلویی بهینه‌شده



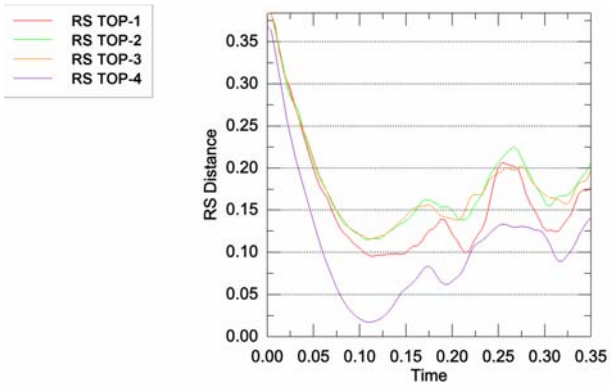
شکل ۲۸- نمودار فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه وسطی بهینه‌شده



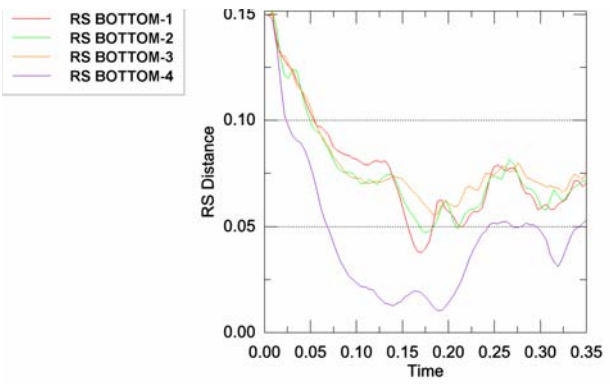
شکل ۲۹- نمودار فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه وسطی بهینه‌شده

ستونها در هر یک از مقطع بدنه‌ها به‌طور جداگانه در دو نقطه بالایی و پایینی فضای سرنشینان، در شکلهای (۲۶) تا (۳۱) ارائه می‌شود که از روی آنها مقدار دقیق تغییر شکل هر یک از ستونها در حین آزمون واژگونی مشخص می‌شود. رسیدن مقدار RS-Distance به صفر یا عددی منفی، گویای تداخل سطح داخلی ستونها با محدوده ایمن سرنشینان می‌باشد که از این تصاویر و نمودارها مشخص است که مقطع-بدنه‌های بهینه‌شده، هیچ تداخلی با فضای سرنشینان نداشته و شرایط آیین‌نامه آزمون رول‌اور را با موفقیت پشت‌سر می‌گذارند.

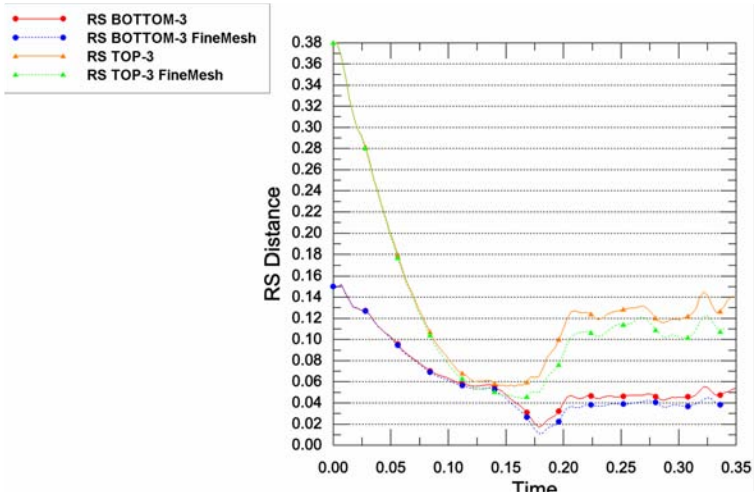
پس از بهینه‌سازی نهایی، به‌منظور بررسی صحت شبیه‌سازیهای انجام‌شده، یک بار دیگر هر یک از تحلیلها با شبکه‌بندی ریزتر انجام می‌گیرد. منظور از شبکه‌بندی ریزتر دو برابرکردن تعداد المانها در نقاطی است که دارای تغییرشکلهای بزرگ هستند، مانند ستونها و محل اتصال آنها با سقف و شاسی. لذا در حین مدلسازی تا آنجا که امکان دارد قسمتهایی مانند سقف و شاسی که تغییرشکلهای کمتری در حین رول‌اور دارند، با المانهای بزرگتر شبکه‌بندی می‌شوند تا زمان تحلیل مسئله کمتر بشود. نهایتاً مقطع-بدنه جلویی با ۲۵۵۰۰۰ المان، مقطع-بدنه میانی با حدود ۲۸۰۰۰۰ المان و مقطع-بدنه عقبی با ۲۵۰۰۰۰ المان تحلیل می‌شود. از نظر شکل ظاهری، در پایان



شکل ۳۰- نمودار فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی بهینه‌شده



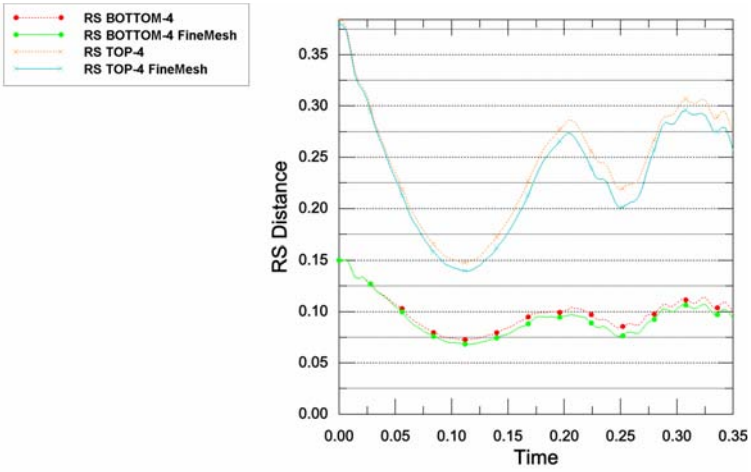
شکل ۳۱- نمودار فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی بهینه‌شده



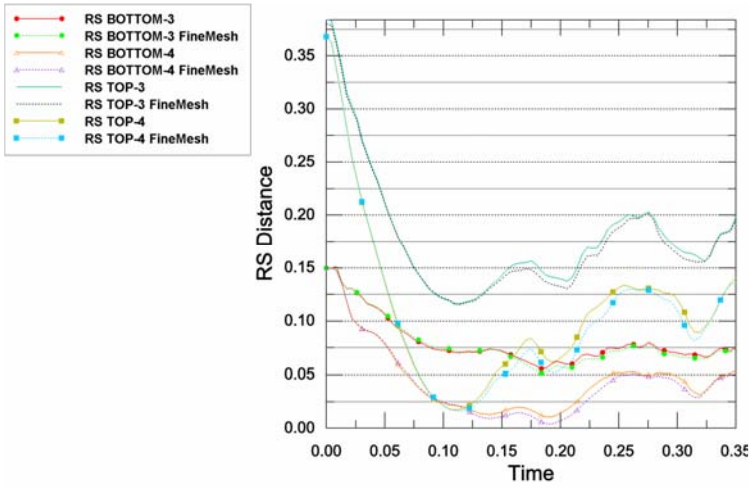
شکل ۳۲- مقایسه فواصل RS Distance برای ستون سوم از مقطع-بدنه جلویی، در دوحالت شبکه‌بندی

شبیه‌سازی آزمون رول‌اور، تفاوت محسوسی میان مدلهای تهیه شده با المانهای ریز و درشت، مشاهده نمی‌شود. به همین‌منظور برای مشاهده این تفاوتها، در هر مقطع-بدنه یک یا دوستون که تغییرشکل بیشتری دارند برای مقایسه نتایج به‌دست آمده به‌کار می‌رود. مقایسه بین فواصل RS.TOP و RS.BOTTOM در ستونهایی که بیشترین تغییرشکل را دارند، برای هر یک از سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی به‌ترتیب در شکلهای (۳۲) تا (۳۴) قابل مشاهده است. از سه تصویر اخیر چنین بر می‌آید که اگر چه اختلاف میان نتایج مربوط به شبکه‌بندی ریزتر در بعضی نقاط زیاد است، اما ستونهای تحلیل‌شده در هر حال (حتی در صورت استفاده از شبکه‌بندی ریزتر که تغییرشکل آنها کمی بیشتر می‌شود) شرایط آیین‌نامه را با موفقیت پشت‌سر می‌گذارند. به‌عبارت دیگر چنین می‌توان گفت که استفاده از شبکه‌بندی ریزتر تأییدی بر صحت تحلیلهای انجام گرفته روی مقاطع بهینه‌شده است. از طرف دیگر با توجه به امکانات موجود، بررسی مسئله با شبکه‌بندی ریزتر از این مقدار، نامعقول به نظر می‌رسد.

اتوبوس O457 پس از بهینه‌سازی، شرایط تعیین‌شده در آیین‌نامه واژگونی را با موفقیت پشت‌سر می‌گذارد و اصطلاحاً در آیین‌نامه تأیید می‌شود. وزن اضافه‌شده ناشی از کاربرد



شکل ۳۳- مقایسه فواصل RS Distance برای ستون چهارم از مقطع-بدنه میانی، در دوحالت شبکه‌بندی



شکل ۳۴- مقایسه فواصل RS Distance برای ستونهای سوم و چهارم از مقطع-بدنه عقبی، در دوحالت شبکه‌بندی

صفحات تقویتی در کل بدنه اتوبوس کمتر از ۲۰۵ کیلو گرم می‌باشد، یعنی چیزی در حدود وزن سه مسافر. توضیح آنکه این مقدار در برابر وزن کل اتوبوس که حدود ۱۲ تن است، ناچیز بوده و اثرات محسوسی روی پایداری و دینامیک خودرو نخواهد گذاشت. همچنین اعمال این تغییرات در روند ساخت، دشوار نیست.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی آزمایش واژگونی به روش عددی و به‌کمک روش اجزای محدود بر روی اتوبوس O457 انجام گرفت. هدف از انجام این تحقیق، مطالعه عملکرد سازه در حین واژگونی و بررسی ارضای شرایط آیین‌نامه واژگونی توسط اتوبوس مذکور است. چنانچه مشاهده شد، تغییرشکلهای ایجاد شده در سازه بیش از حد مجاز تعیین‌شده در استاندارد بوده و اتوبوس O457 فعلی نمی‌تواند شرایط تعیین‌شده در آزمون واژگونی ECE66 را ارضا کند. با اعمال تغییراتی ساده ولی مؤثر در بدنه، اتوبوس مذکور قادر خواهد بود شرایط آزمون را ارضا کند. همچنین نتایج و نمودارهای به‌دست آمده به‌صورت کیفی با نتایج تجربی دیگران برروی اتوبوسهای تقریبا مشابه مقایسه‌شده و روند قابل قبولی داشته‌اند.

واژه نامه

1. tripped
2. untripped
3. residual space
4. body section
5. super structure
6. conventional
7. solid break
8. 8-hourglassing
9. abaqus explicit

مراجع

1. Conroy, C., David, B., Hoyt, A., Eastman, B., Erwin, S., Pacyna, Sh., .Holbrook, T.L., Vaughan, T., Sise, M., Kennedy, F., and Velky, T., ″Rollover Crashes: Predicting Serious Injury Based on Occupant, Vehicle and Crash Characteristics, *Accident Analysis & Prevention*,″ No.38, pp.835-842, 2006.
2. Henty, M. E., ″Virtual Simulation of a Pickup Truck Rollover Test using the Nonlinear Finite Element Code PAM-CRASH,″ Master Thesis, The Pennsylvania State University, May 2003.
3. Initiatives to Address the Mitigation of Vehicle Rollover, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Report,″ June 2003.
4. Fatality Analysis Reporting System (FARS), National Automotives Sampling System (NASS) & Crashworthiness Data System (CDS) From Police-Reported Rollover Crashes,″ 2001.
5. Niii, N., and Nakagawa, K., ″Rollover Analysis Method of Large-Sized Bus,″ *Isuzu Motors Ltd Japan*, Paper No 96-S11-O-05, pp. 1845-1853, 1996.
6. Belingardi G., Gastaldin D., Martella P., and Peroni L.," Coach Passenger Injury Risk During Rollover: Influence of the Seat and the Restraint System,″ *Department of Mechanical Engineering, Polytechnic of Torino*, Paper No 05-0439, 2005.
7. Rollover Standard ECE No.66, ″UNIFORM TECHNICAL PRESCRIPTIONS CONCERNING THE APPROVAL OF LARGE PASSENGER VEHICLES WITH REGARD TO THE STRENGTH OF THEIR SUPERSTRUCTURE,″ 2006.
8. ABAQUS Documentation, Version 6.6″.
9. Matolcsy M., ″Body Section Rollover Test as an Approval Method for Required Strength of Bus Superstructure,″ *SAE Technical Paper Series*, Vol. #2001-01-3209, PP 25-31, 2001.
10. Koji, K., Yutaka, K., Hidehiko, E., and Shigeaki, Sh., ″An Analysis Method for Rollover Strength of Bus Structures, ″*Hino Motors Ltd Japan*, Paper No 94-S11-O-11, pp. 1776-1784, 1994.